

超高频 RFID 系统中一种可行的 时间最优防碰撞算法

苏 健¹, 韩 雨¹, 骆忠强², 谢良波¹, 文光俊¹

(1. 电子科技大学通信与信息工程学院, 四川成都 611731; 2. 电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 四川成都 611731)

摘 要: 动态帧时隙 ALOHA (DFSA) 算法是一种应用广泛的防碰撞技术, 主要用于解决超高频 (UHF) 射频识别系统 (RFID) 中的标签碰撞问题. 在 DFSA 算法中, 读写器需要准确估计剩余标签数并设定一个新的帧长度来识别这些标签. 因此, 碰撞检测 (CD) 和标签剩余数估计在 DFSA 中起着关键性的作用. 现有的碰撞检测方法并不能足够有效的用于检测碰撞并导致识别性能的下降. 为了减少计算量和提高识别性能, 本文提出了一种有效的防碰撞算法, 该算法结合了碰撞检测和待识别标签数估计方法, 使得性能更加高效. 理论分析和仿真结果表明, 该算法的性能要优于现有的同类算法, 这非常有助于设计一种快速而高效的读写器.

关键词: 射频识别; 防碰撞; ALOHA; 时间效率

中图分类号: TP399 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)08-1651-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.08.027

A Feasible Time-Optimal Anti-Collision Algorithm for UHF RFID Systems

SU Jian¹, HAN Yu¹, LUO Zhong-qiang², XIE Liang-bo¹, WEN Guang-jun¹

(1. School of Communications and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China; Chengdu, Sichuan 611731, China; 2. National Key Lab of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract: Dynamic frame slotted ALOHA (DFSA) is a popular anti-collision technique to resolve a tag collision problem in ultrahigh-frequency (UHF) radio-frequency identification (RFID) systems. In DFSA, the reader needs to accurately estimate tag backlog and set a new frame size for identifying the backlog. Thus, collision detection (CD) and tag backlog estimation play important roles in DFSA. Existing CD schemes do not respond efficiently enough to detect a collision and result in a degradation of identification performance. To reduce computation load and improve identification performance, a feasible anti-collision algorithm that combines collision detection and tag backlog estimation is designed to make the performance more efficient. Theoretical analysis and simulation results show that the performance of the proposed algorithm is better than most existing anti-collision solutions. The results obtained were useful for the design of fast, efficient readers.

Key words: radio frequency identification (RFID); anti-collision; ALOHA; time efficiency

1 引言

RFID 是一种新兴的无线通信技术, 被广泛的应用于供应链管理, 交通控制等领域^[1], 以尽可能有效而准确的识别大量物品. 当两个或两个以上的标签同时与读写器进行通信时, 信号会相互干扰, 从而产生碰撞. 碰撞会降低 RFID 系统的识别效率. 因此, 在一个标签密集的 RFID 系统中, 往往需要采用一种有效的防碰撞算法来识别多个标签.

DFSA 算法已经被广泛的应用于一些新的 UHF RFID 标准中, 包括 ISO/IEC 18000-6C 和 EPCglobal C1 Gen2^[2]. 对于常规防碰撞算法, 只有当帧长度等于待识别标签数时, 这些算法才能达到理论最大吞吐率 0.368^[3,4]. 然而, 帧大小会受到现有 RFID 系统的规格的限制. 例如, 在 EPC global C1 Gen2 标准中, 可用的帧长度限制为 2 的整数次幂. 因此, 不得不考虑帧长度的限制对吞吐率的影响. 毫无疑问, 对系统中待识别标签数估计的准确性也会影响 RFID 系统的识别效率. 因此, 之

前的许多研究主要集中在如何更为准确的估计剩余标签数^[5~7].为了提高标签数估计的准确度,这些方法需要增加计算负荷或额外的存储空间.尽管性能在某种程度上得以提升,但是所需的成本也随之增加.从便于实现的角度,防碰撞算法的设计应该考虑计算复杂度问题.文献[8]中提出了一种分离二进制树隙ALOHA(Splitting BTSA)算法.该算法的优势在于,它无须估计标签数,其识别效率不受标签数变化的影响.然而 Splitting BTSA 算法要想实现较高的效率,它的初始帧长度应设定为一个更接近标签数的值,由于系统内的标签数是未知的,所以这点难以实现.Yim 等作者提出了一种防碰撞算法(DFSA-L),该算法利用更少的时隙观测结果来确定下一帧的帧长度从而提高系统整体的识别性能^[9].

在本文中,针对算法在 EPCglobal C1 Gen2 标准上的可行性以及更好的识别性能,我们提出了一种部分帧时隙的标签识别算法(PF-DFSA).其核心思想是通过部分时隙的观测结果来决定下一帧的长度,而不再基于传统的完整帧的观测结果.此外,我们在原有 EPCglobal C1 Gen2 标准协议的基础上提出了一种改进的碰撞检测方法,该方法可以提高碰撞检测性能.考虑到时隙间持续时间的差异,时隙最优或吞吐率最优的算法在识别时间方面可能缺乏有效性,我们在算法的设计中考虑了时间效率和识别速度等指标.同传统的 DFSA 算法相比,本文提出的算法可以实现更高的时间效率和更快的识别速度.

2 PF-DFSA 算法

DFSA 算法的一个主要特征就是帧长度的动态调整. DFSA 算法的性能依赖于帧长度的准确调整.为了实现 DFSA 算法,EPCglobal C1 Gen2 标准制定了一系列命令,主要包括 Select, Query, QueryAdjust, QueryRep 以及 Ack.在标签被识别之前,读写器利用 Select 命令选择一个特定的标签群来进行下一步的盘存和访问.读写器通过发送一个带有 Q 参数的 Query 命令来开始盘存周期.其中 $0 \leq Q \leq 15$,帧长度为 2^Q .当标签接收到 Query 命令时,自身的随机数发生器(RNG)会从 0 到 $2^Q - 1$ 之间随机选取某值载入槽计数器.这个槽计数器的值会被 QueryRep 命令减 1,直到计数器的值为 0,标签就会响应读写器命令并返回一个 16 比特的随机数 RN16. Query 命令会产生三种可能的结果:单个标签应答(成功时隙),多标签应答(碰撞时隙)和无应答(空闲时隙),如图 1 所示.

与传统碰撞检测方法不同的是,本文所提出的碰撞检测不再基于对 RN16 的检测.图 2 所示为本文中所采用的碰撞检测方法的一个示例.在这个示例中,我们

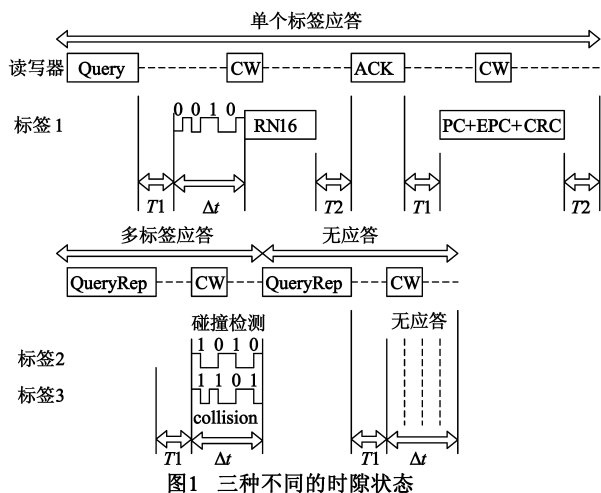


图1 三种不同的时隙状态

可以看到,每个标签向读写器返回 RN16 之前都会先发送一个持续时间为 Δt 的 k ($4 \leq k \leq 8$) 比特随机脉冲信号(脉冲信号采用曼彻斯特编码方式).读写器可以通过监测标签发送的随机脉冲信号来检测碰撞.同一时隙内,当两个或两个以上的标签产生不同的随机脉冲时,读写器就能通过曼彻斯特编码有效的识别碰撞.与 EPCglobal C1 Gen2 标准中的传统碰撞检测方法相比,本文所提出的方法效率更高.因为识别碰撞所需要的时间 Δt 要远小于 RN16 的持续时间.大多数现有的防碰撞算法估计标签数都是基于上一帧的时隙观测结果,从而调整帧长度进行下一轮的盘存.然而,EPCglobal C1 Gen2 标准指定了一种帧内调整机制.该机制允许读写器在规定帧中的任一时隙内改变 Q 值从而调整帧长度,但是标准并未详细给出相应的调整策略.因此,可以通过观测一小部分时隙的状态统计出碰撞概率和空闲概率,从而根据碰撞概率和空闲概率的比例关系来决定下一帧的长度^[9].本文所提出的 PF-DFSA 算法正是基于这种部分帧时隙(PF)统计结果来调整帧长度. PF 时隙是指盘存周期中的前 m 个时隙.读写器工作域内的标签在当前帧中随机选择一个时隙来响应读写器的盘存命令(如图 2 所示).

在 PF 个时隙之后,读写器根据时隙状态的统计结果来计算空闲概率和碰撞概率之比.如果该比值超过既定范围,那么读写器就会根据计算结果来确定下一帧的长度.在最优 DFSA 算法中(帧长度等于待识别标签数),系统的最高吞吐率近似 0.368.当系统吞吐率超过缺省值时,就可以认为帧长度的调整是合适的.假定一个系统内存在 n 个待识别的标签,帧长度为 F ,那么吞吐率可以计算为^[5]:

$$U = \frac{n}{F} (1 - 1/F)^{n-1} \quad (1)$$

图 3 显示了不同帧长度下 DFSA 算法的吞吐率的

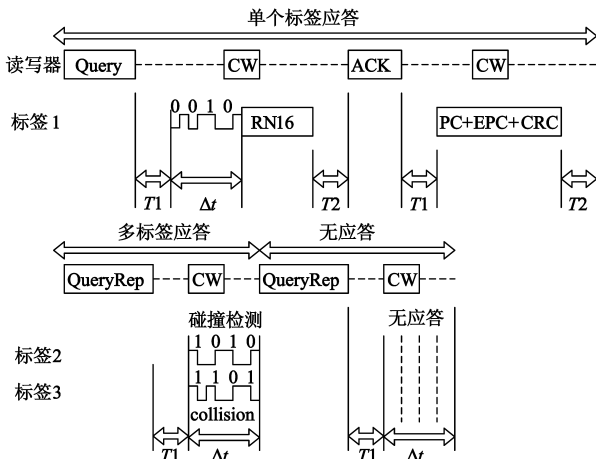


图2 PF-DFSA算法的碰撞检测示例

变化.按照 EPCglobal C1 Gen2 标准的规定,帧长度只能为 2 的幂次方.为了实现稳定的吞吐率,应为给定的待识别标签数设置合适的帧长度.由图 3 所示,合适的帧长度可以由式(1)计算得到,表 1 列出了待识别标签数和适合的帧长度之间的关系.

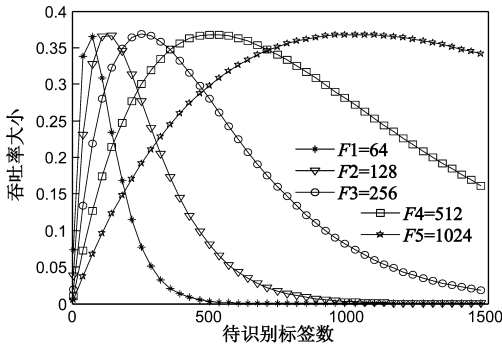


图3 DFSA算法吞吐率

表 1 帧长度和标签数之间的关系

Q	帧长度 ($F = 2^Q$)	适合的标签数范围 n_1 到 n_2
2	4	1 ~ 5
3	8	6 ~ 11
4	16	12 ~ 22
5	32	23 ~ 44
6	64	45 ~ 89
7	128	90 ~ 177
8	256	178 ~ 355
9	512	356 ~ 710
10	1024	711 ~ 1420

吞吐率同空闲概率和碰撞概率之间的关系如图 4 所示,其中 P_e 和 P_c 分别表示空闲概率和碰撞概率.如果我们预设吞吐率作为缺省值,就可以得出空闲概率和碰撞概率的相应范围.因此,通过图 3 和图 4 我们可以

得出如下关系式:

$$U \geq 0.35, 0.8P_c \leq P_e \leq 2.7P_c \quad (2)$$

$$P_e = \left(1 - \frac{1}{F}\right)^n \quad (3)$$

$$P_c = 1 - \left(1 - \frac{1}{F}\right)^n - \frac{n}{F} \left(1 - \frac{1}{F}\right)^{n-1} \quad (4)$$

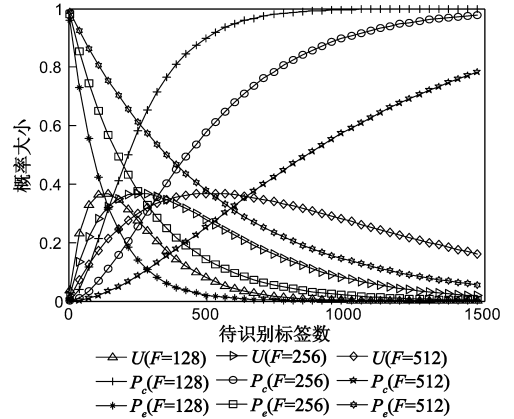


图4 不同 n 、 F 下的 U, P_e 以及 P_c 的关系

这样一来,当读写器统计出的空闲概率和碰撞概率满足式(2)时,我们就认为此时的帧长度是适合的,否则就认为不合适,需要立即作出调整.综上所述,本文所提出的防碰撞算法伪代码如图 5 所示.其中 C_{PF} 为部分帧 F_{PF} 中所统计出的碰撞时隙 (F_{PF} 为完整帧 F 的一部分), C 为完整帧 F 中所统计出的碰撞时隙.读写器通过广播一个盘存命令来开启一个盘存周期,此时设置一个初始化的帧长度 F_{ini} 和部分帧长度 F_{PF} .在 F_{PF} 个时隙之后,读写器会统计 F_{PF} 时隙内相应的 P_e 和 P_c .如果 P_e 和 P_c 之间的比值在预设的范围内,那么就说明当前完整帧长度 F 是合适的,盘存过程会继续直到全帧结束.否则,盘存过程会在 F_{PF} 时隙后立即结束,下一帧的帧长度会通过算法 1 所示方式计算得到.根据剩余标签的估计值,读写器利用 QueryAdjust 命令来调整 Q 值从而改变帧长度,具体调整策略如表 1 所示.

算法 1

1. procedure 标签识别
2. 初始化 $F = F_{ini}, F_{PF}$
3. $i = 0$;
4. while 存在待识别标签
5. $i = i + 1$;
6. 每个标签在 F 个时隙中随机选择一个来发送数据如(如图 2 所示).
7. 读写器计算 P_e, P_c
8. if $0.8P_c \leq P_e \leq 2.7P_c$
9. $n_{est} = S + 2.39C$, 并根据 n_{est} 值设置一个新的帧长度(如表 1 所示)
10. else

11. $n_{est} = (S_{PF} + 2.39C_{PF}) \times (F/F_{PF})$, 并根据 n_{est} 值设置一个新的帧长度 (如表 1 所示)
12. end if
13. end while
14. end procedure

3 算法性能分析

本节评估和分析了 PF-DFSA 算法的性能. 本文将采用时间效率和单个标签的平均识别时间这两个指标来对 PF-DFSA 算法进行性能评估. 根据 EPCglobal C1 Gen2 标准的参数规定, 时间效率可以定义为:

$$T_{\text{efficiency}} = \frac{S \cdot T_{\text{succ}}}{S \cdot T_{\text{succ}} + E \cdot T_{\text{idle}} + C \cdot T_{\text{col}}} \quad (5)$$

其中 E, S 和 C 分别为盘存过程中, 空闲时隙, 成功时隙和碰撞时隙的出现次数. 相应的, $T_{\text{idle}}, T_{\text{succ}}$ 和 T_{col} 为上述各种时隙状态的持续时间, 可以分别表示为:

$$T_{\text{idle}} = T_{\text{QueryRep}} + T_1 + T_3 \quad (6)$$

$$T_{\text{succ}} = T_{\text{Query}} + 2(T_1 + T_2) + T_{\text{RN16}} + T_{\text{ACK}} + T_{\text{PC+EPC+CRC}} \quad (7)$$

$$T_{\text{col}} = T_{\text{QueryRep}} + T_1 + T_{\text{RN16}} + T_2 \quad (8)$$

注意式(6)~(8)为传统防碰撞算法下各时隙状态的持续时间, 如图 1 所示. 对于本文提出的算法, 识别所有标签所需的总时间为:

$$T_{\text{total}} = E(T_{\text{idle}} - T_3 + \Delta t) + S(T_{\text{succ}} + \Delta t) + CP_{\text{succ}}(T_{\text{idle}} - T_3 + \Delta t) + C(1 - P_{\text{succ}})(T_{\text{col}} + \Delta t) \quad (9)$$

式(9)中, Δt 为 PF-DFSA 算法所需的额外的时间开销, P_{succ} 为碰撞检测的平均成功概率. 碰撞检测由时隙 ALOHA 机制调度, 当碰撞发生时, 如果碰撞时隙内的所有标签在发送 RN16 之前均产生相同的随机脉冲, 那么碰撞就无法被成功检测. 假定读写器工作域内存在 n 个待识别标签, 帧长度为 $F, \Delta t$ 中的随机脉冲数为 k , 碰撞检测的平均成功率可以计算为:

$$P_{\text{succ}} = \sum_{r=2}^n \binom{n}{r} (1/F)^r (1 - 1/F)^{n-r} \times [1 - (1/k)^{r-1}] \quad (10)$$

通过式(5), (9), (10)我们就可以得出 PF-DFSA 算法的时间效率.

4 实验仿真与分析

本节采用蒙特卡罗方法对 PF-DFSA 算法和参考算法进行了性能比较. 为了得到算法的时间效率, 我们需要计算防碰撞过程中每个步骤的持续时间. 表 2 列出了仿真所使用的主要的时间参数. 参数值的设定参照 EPCglobal C1 Gen2 标准. 值得注意的是, PF-DFSA 算法中

碰撞时隙的持续时间取决于碰撞是否能够被成功检测.

表 2 主要仿真参数

参数	取值(μs)	参数	取值(μs)
读写器到标签前导码	112.5	PC + EPC + CRC	800
标签到读写器前导码	112.5	T_1	62.5
Query 命令	412.5	T_2	62.5
QueryRep 命令	75	T_3	50
ACK 命令	337.5	T_4	112.5
$\Delta t (k=5)$	31.25	RN16	100
T_{succ} (其他算法)	2012.5	T_{succ} (本文算法)	2043.8
T_{idle} (其他算法)	300	T_{idle} (本文算法)	281.25
T_{col} (其他算法)	750	T_{col} (本文算法)	781.25/281.25

结合上文的分析, 在 PF-DFSA 算法中, 如果碰撞可以被成功检测, T_{col} 的值就为 $281.25\mu\text{s}$, 否则就为 $781.25\mu\text{s}$. 我们首先比较了各种算法的时间效率. 图 5 比较了 PF-DFSA 算法、DFSA 算法^[5]、Splitting BTSA 算法^[8]以及 DFSA-L^[9]算法识别不同数量的标签时的时间效率. 初始帧长设置为 64. 从图 5 中可以看出, 四条曲线的效率从高到低分别为, PF-DFSA, DFSA-L, Splitting BTSA 和 DFSA. 这就意味着 PF-DFSA 算法的性能优于现有方案. 图 6 为初始帧长设为 64 时, 各类算法识别单个

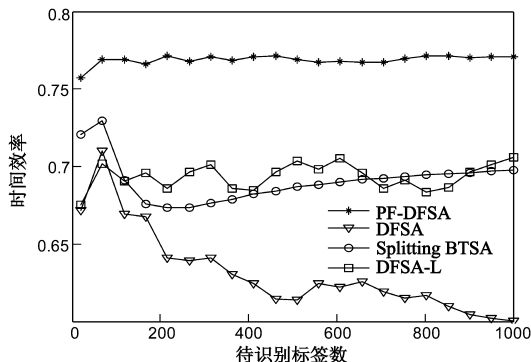


图5 时间效率的比较

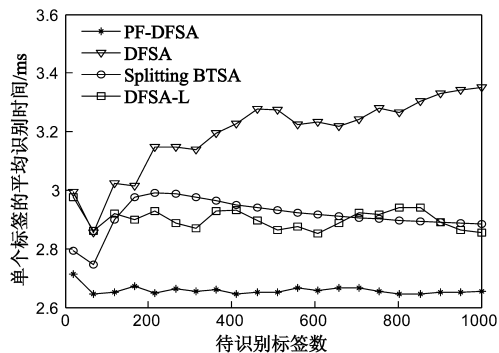


图6 识别速度比较

标签所需的平均识别时间的仿真结果. 同时间效率的仿真结果类似, 本文所提出的 PF-DFSA 算法的识别速度要优于其它算法. 例如, PF-DFSA 算法识别单个标签仅需要 2.65ms, 识别速度大约为每秒 377 个标签. 其识别性能分别高出 DFSA-L 算法和 Splitting BTSA 算法大约 8.9% 和 10.2% .

5 结论

本文提出了一种基于 EPCglobal C1 Gen2 标准的低复杂度的 RFID 多标签防碰撞算法. 该算法根据部分帧时隙的观测结果和有效的碰撞检测方法来实现下一帧的帧长度调节, 其特点是简单快捷. 此外, 我们所提出的算法考虑了 EPCglobal C1 Gen2 标准对帧长度的约束, 推导了一个给定帧长度同与之适合的待识别标签数范围之间的关系, 从而提高识别性能. 仿真结果显示, 该算法优于现有基于 ALOHA 协议的防碰撞算法.

参考文献

- [1] 宋建华, 郭亚军, 韩兰胜, 王志皓. 自调整混合树 RFID 多标签防碰撞算法[J]. 电子学报, 2014, 42(4): 685 - 689.
Song Jian-hua, Guo Ya-jun, Han Lan-sheng, Wang Zhi-hao. An adjustive hybrid tree anti-collision algorithm for RFID multi-tag identification[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(4): 685 - 689. (in Chinese)
- [2] EPC global, EPC radio-frequency identify protocols class-1 generation-2 UHF RFID protocol for communications at 860 MHz-960 MHz ver. 1.2.0.2008[S].
- [3] W Su, N V Alchazidis, T T Ha. Multiple RFID tags access algorithm[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 3(2): 174 - 187.
- [4] Y Maguire, R Pappu. An optimal Q-algorithm for the ISO 18000-6C RFID protocol[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2009, 6(1): 16 - 24.
- [5] W-T Chen. An accurate tag estimate method for improving the performance of an RFID anti-collision algorithm based on dynamic frame length ALOHA [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2009, 6(1): 9 - 15.
- [6] Vogt H. Efficient object identification with passive RFID tags [A]. International Conference on Pervasive Computing [C].

Zurich, Switzerland: Springer-Verlag, 2002. 98 - 113.

- [7] H Wu, Y Zeng. Bayesian tag estimate and optimal frame length for anti-collision ALOHA RFID system[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2010, 7(4): 963 - 969.
- [8] H Wu, Y Zeng, J Feng, Y Gu. Binary tree slotted ALOHA for passive RFID tag anti-collision[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2013, 24(1): 19 - 31.
- [9] S B. Yim, J Park, T J Lee. Novel dynamic framed-slotted ALOHA using litmus slots in RFID systems[J]. IEICE Transactions on Communications, 2012, 95(4): 1375 - 1383.

作者简介



苏 健 男, 1986 年 3 月出生于湖北荆州. 电子科技大学通信与信息工程学院博士研究生. 研究方向为物联网技术、无线射频识别技术、认知无线网络.

E-mail: xiaoyanzi850603@163.com



韩 雨 男, 1991 年 10 月出生于河南商丘. 电子科技大学通信与信息工程学院博士研究生. 主要研究方向为射频集成电路与系统、无线射频识别技术等.

骆忠强 男, 1986 年 2 月出生于四川崇州. 电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室博士研究生. 研究方向为盲源分离技术、无线通信技术.

谢良波 男, 1986 年 1 月出生于四川成都. 电子科技大学通信与信息工程学院博士研究生. 研究方向为无线射频识别技术、低功耗模拟/数字电路设计.

文光俊 男, 1964 年 8 月出生于四川南充. 电子科技大学通信与信息工程学院博士生导师, 主要研究方向为射频/微波/毫米波集成电路与系统、通信网络与宽带通信、新型电磁材料、无线传感器等技术领域.